

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Inventor : YUUTA NAKAYA, et al.
Filed : Concurrently herewith
For : MIMO WIRELESS COMMUNICATION...
Serial Number : Concurrently herewith

March 16, 2004


Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

PRIORITY CLAIM AND
SUBMISSION OF PRIORITY DOCUMENT

S I R:

Applicant hereby claims priority under 35 USC 119 from **Japanese** patent application number **2003-200446** filed **July 23, 2003**, a copy of which is enclosed.

Respectfully submitted,



Thomas J. Bean
Reg. No. 44,528

Customer Number:
026304
Docket No.: FUJI 21.070

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 3 年 7 月 2 3 日
Date of Application:

出 願 番 号 特 願 2 0 0 3 - 2 0 0 4 4 6
Application Number:

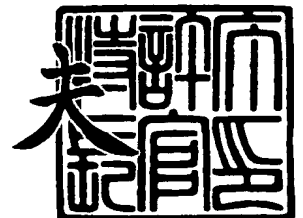
[ST. 10/C] : [J P 2 0 0 3 - 2 0 0 4 4 6]

出 願 人 富 士 通 株 式 会 社
Applicant(s):

2 0 0 3 年 1 2 月 1 8 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今 井 康



出証番号 出証特 2 0 0 3 - 3 1 0 5 0 8 8



【書類名】 特許願

【整理番号】 0350663

【提出日】 平成15年 7月23日

【あて先】 特許庁長官 今井 康夫 殿

【国際特許分類】 H04J 11/00

【発明の名称】 M I M O方式の無線通信システム及び無線通信装置

【請求項の数】 10

【発明者】

 【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内

 【氏名】 中谷 勇太

【発明者】

 【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内

 【氏名】 戸田 健

【発明者】

 【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内

 【氏名】 大石 泰之

【発明者】

 【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内

 【氏名】 横尾 郁

【特許出願人】

 【識別番号】 000005223

 【氏名又は名称】 富士通株式会社

**【代理人】****【識別番号】** 100070150**【住所又は居所】** 東京都渋谷区恵比寿4丁目20番3号 恵比寿ガーデン
プレイスタワー32階**【弁理士】****【氏名又は名称】** 伊東 忠彦**【電話番号】** 03-5424-2511**【手数料の表示】****【予納台帳番号】** 002989**【納付金額】** 21,000円**【その他】** 国等の委託研究の成果に係る特許出願（平成14年度通信・放送機構「新世代移動機用適応アンテナシステムに関する研究開発」委託研究、産業活力再生特別措置法第30条の適用を受けるもの）**【提出物件の目録】****【物件名】** 明細書 1**【物件名】** 図面 1**【物件名】** 要約書 1**【包括委任状番号】** 0114942**【プルーフの要否】** 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 MIMO方式の無線通信システム及び無線通信装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 高周波信号を送信又は受信する複数のアンテナ手段と、前記複数のアンテナ手段に関する重みを与える重み付け制御手段を有する、多入力多出力方式の無線通信システムに使用される無線通信装置であって、

前記複数のアンテナ手段の少なくとも 1 つを形成する適応アレーアンテナ手段が、複数のアンテナエレメントを有し、複数のアンテナエレメントの各々に関する重みを変化させることで、指向性を変化させることが可能であり、

前記重み付け制御手段が、

前記複数のアンテナ手段の各々に関連する無線伝搬路の伝達特性を表す現在のチャネル行列と、前記現在のチャネル行列の共役転置行列との積で表現される行列の固有値を算出する手段と、

前記算出された固有値の平均値を含むが、前記固有値の最小値を含まない所定の範囲内に、総ての固有値が含まれるようなチャネル行列を算出する逆算手段と、

前記現在のチャネル行列が、前記逆算手段で算出されたチャネル行列に近づくように、前記適応アレーアンテナ手段の指向性を調整する手段

を有することを特徴とする無線通信装置。

【請求項 2】 更に、前記複数のアンテナ手段の各々に対応して設けられ、デジタル信号及びアナログ信号の間で信号形式を変換する変換手段を有し、前記重み制御手段が、複数の変換手段に入力される又はそこから出力される信号に重みを付加することを特徴とする請求項 1 記載の無線通信装置。

【請求項 3】 前記複数のアンテナ手段の各々が、適応アレーアンテナ手段より成ることを特徴とする請求項 1 記載の無線通信装置。

【請求項 4】 前記適応アレーアンテナ手段が、前記複数のアンテナエレメントである複数の給電アンテナと、各給電アンテナからの信号を合成する合成部とを有し、各給電アンテナに関連する高周波信号の相対的な振幅又は位相を変化させることで、前記指向性が調整されることを特徴とする請求項 1 記載の無線通

信装置。

【請求項 5】 前記適応アレーアンテナ手段における複数のアンテナエレメントが、1つの給電アンテナ及び複数の無給電アンテナより成り、前記複数の無給電アンテナの各々に設けられた可変リアクタンス値を変化させることで、前記指向性が調整されることを特徴とする請求項 1 記載の無線通信装置。

【請求項 6】 更に、受信した高周波信号を測定することで、前記現在のチャンネル行列を求める手段を有することを特徴とする請求項 1 記載の無線通信装置。

【請求項 7】 前記チャンネル行列を求める手段が、前記複数のアンテナ手段の各々に予め割り当てられている互いに直交する符号系列を利用して、前記チャンネル行列の行列要素を区別することを特徴とする請求項 6 記載の無線通信装置。

【請求項 8】 前記逆算手段が、総ての固有値が前記平均値に等しくなるようなチャンネル行列を算出することを特徴とする請求項 1 記載の無線通信装置。

【請求項 9】 無線送信装置及び無線受信装置を有し、前記無線送信装置又は前記無線受信装置の少なくとも一方が、請求項 1 記載の無線通信装置より成ることを特徴とする多入力多出力方式の無線通信システム。

【請求項 10】 前記無線送信装置及び前記無線受信装置の双方で、前記現在のチャンネル行列が知られていることを特徴とする請求項 9 記載の多入力多出力方式の無線通信システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、多入力多出力（MIMO: Multiple Input Multiple Output）方式の無線通信システム、及びMIMO方式の無線通信システムで使用される無線通信装置に関連する。

【0002】

【従来の技術】

この種の技術分野では、通信容量、通信速度、通信品質、資源利用効率等を改善する無線インターフェースに関する研究が盛んに行われている。中でも特に注

目されているMIMO方式では、送信側及び受信側の双方に複数のアンテナを設け、無線伝搬路を介した多入力多出力系を構成する。送信及び受信に使用するアンテナ数を増やすことで、空間の利用性が高まり、伝送容量の向上等を図ることが可能になる。

【0003】

図1は、MIMO方式の通信システムの概念図を示す。説明の便宜上、左側を送信側とし、右側を受信側とするが、通常は双方が送受信機能を有する。送信側のM個のアンテナの各々を通じて送信信号ベクトル $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t))^T$ が送信される。但し、「T」は、転置 (transpose) を表し、Mは2以上の整数である。M個のアンテナの各々には、調整可能な重み μ_j を付加することが可能である。但し、jは、1以上M以下の整数である。同様に、受信側にはN個のアンテナが設けられており、各アンテナで受信した信号に基づいて、受信信号ベクトル $y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t))^T$ が得られる。但し、Nは2以上の整数であり、Mと同一であっても良いし、異なっても良い。受信側のN個の各アンテナにも、調整可能な重み ν_i を付加することが可能である。但し、iは、1以上N以下の整数である。

【0004】

この場合において、送信ベクトル $x(t)$ 及び受信ベクトル $y(t)$ の間には、次式(1)が成立するものとする。

【0005】

【数1】

$$y(t) = \sqrt{\frac{\rho}{M}} Hx(t) + n(t) \quad \dots (1)$$

ここで、Hは、各アンテナ間の無線伝搬路の伝達特性を表すチャネル行列であり、その行列要素 h_{ij} は、送信側のj番目のアンテナと、受信側のi番目のアン

テナとの間の無線伝搬路に関する伝達特性（ベースバンド表現）を表す。但し、 i は 1 以上 N 以下の整数であり、 j は 1 以上 M 以下の整数である。従って、チャネル行列 H は、 N 行 M 列 ($N \times M$) 型の行列である。 ρ は送信電力を表す。 $n(t)$ は、無線伝搬路で導入されるノイズベクトルを表し、加法性ガウス雑音ベクトルで表現できることを想定している。即ち、任意の時点における雑音成分が、ガウス分布に従う乱数により評価できるものとする。

【0006】

チャネル行列 H に関する知識を受信側が有する場合には、周波数当たりの（最大）信号伝送速度 (bps/Hz) で表現される通信路容量（これは、シャノン容量 (Shannon capacity) とも呼ばれている。）は、送信及び受信ベクトル $x(t)$, $y(t)$ に関する条件付相互情報量 $I(x; y | H)$ の期待値をとることで、次式 (2) のように評価することが可能である。

【0007】

【数 2】

$$E[I(x; y | H)] \leq E \left[\log \det \left(I_N + \frac{\rho}{M} H H^* \right) \right] \quad \dots (2)$$

但し、 H はエルゴード性 (ergodicity) を示し、アンサンブル平均を時間平均で評価し得るものとする。ここで、 $E[\cdot]$ は期待値をとることを表す。 I_N は N 次元の単位行列を表す。「 $*$ 」は、共役転置 (transposed conjugate) を表す。 $\det(\cdot)$ は、行列式を表す。

【0008】

更に、受信側及び送信側の双方でチャネル行列 H に関する知識が共有される場合には、通信路容量 C は、次式 (3) のように表現され得る。

【0009】

【数 3】

$$C = \sum_{i=1}^{\alpha} \log_2 \left[1 + \frac{\rho}{M} \lambda_i \right] \quad \dots (3)$$

但し、 α 、 λ_i は、 HH^* で表現される行列の階数 (rank) 及び i 番目の固有値 (eigenvalue) を表す。但し、 i は 1 以上 α 以下の整数である。

【0 0 1 0】

尚、MIMO方式の無線通信システム及び通信路容量については、例えば、非特許文献 1 乃至 4 に記載されている。

【0 0 1 1】

【非特許文献 1】

I.E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," Bell Labs. echnical Memorandum, 1995. See also Europ. Trans. Telecommun., vol.10, no.6, pp.585-595, Nov.-Dec. 1999.

【0 0 1 2】

【非特許文献 2】

G.J. Foschini and M. Gans, "On the limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas, Wireless Personal Commun.," vol. 6, no. 3, pp. 311-335, Mar. 1998.

【0 0 1 3】

【非特許文献 3】

G.J.Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," Bell Syst. Tech. J., vol. 1, no. 2, pp. 41-59, 1996.

【0 0 1 4】

【非特許文献 4】

J.B. Andersen, "Array gain and capacity for known random channels with

multiple element arrays at both ends,” IEEE J. Sel. Areas in Commun., vol. 18, no. 11, pp. 2172-2178, Nov. 2000.

【0015】

【発明が解決しようとする課題】

上記の数式(3)によれば、行列 HH^* の各固有値 λ_i に対応する複数の通信路(通信路容量) C_i を考えた場合に、これらの通信路 C_i の総和が全体の通信路容量 C を与える、と解釈できる。この場合において、個々の通信路容量 C_i の大小は固有値 λ_i の大小に対応するので、小さな固有値に対応する通信路容量は小さく、そのような通信路は、スループットや誤り率の悪い通信路を与える。このため、固有値が小さすぎる場合には、その固有値に対応する通信路容量は、実際の無線通信に使用することが困難になり、結局、全体の通信路容量 C の一部しか利用できないことになってしまう。

【0016】

本願の課題は、周波数当たりの最大信号伝送速を定めるシャノンの通信路容量の内、実際の通信に利用することの可能な通信路容量を向上させるMIMO方式の無線通信システム及びMIMO方式の無線通信システムに使用される無線通信装置を提供することである。

【0017】

【課題を解決するための手段】

本発明によれば、

高周波信号を送信又は受信する複数のアンテナ手段と、前記複数のアンテナ手段に関する重みを与える重み付け制御手段を有する、多入力多出力方式の無線通信システムに使用される無線通信装置であって、

前記複数のアンテナ手段の少なくとも1つを形成する適応アレーアンテナ手段が、複数のアンテナエレメントを有し、複数のアンテナエレメントの各々に関する重みを変化させることで、指向性を変化させることが可能であり、

前記重み付け制御手段が、

前記複数のアンテナ手段の各々に関連する無線伝搬路の伝達特性を表す現在のチャネル行列と、前記現在のチャネル行列の共役転置行列との積で表現される行

列の固有値を算出する手段と、

前記算出された固有値の平均値を含むが、前記固有値の最小値を含まない所定の範囲内に、総ての固有値が含まれるようなチャネル行列を算出する逆算手段と

、

前記現在のチャネル行列が、前記逆算手段で算出されたチャネル行列に近づくように、前記適応アレーアンテナ手段の指向性を調整する手段

を有することを特徴とする無線通信装置

が、提供される。

【0018】

【作用】

以下、各種のシミュレーション結果を示しながら、本発明の原理を説明する。

【0019】

図2は、 $M=N=2$ の場合の、行列 HH^* の固有値のばらつきに関するシミュレーション結果を示す。縦軸は固有値の累積分布を表し、横軸は固有値の大きさを表す。このシミュレーションでは、主に以下の条件及び手順が採用されている。

【0020】

(1) 平均値を0とし、標準偏差を1とする複素ガウス分布 ($CN(0, 1)$) に従って乱数を発生させ、チャネル行列 H の行列要素 h_{ij} を決定する。

【0021】

(2) 決定したチャネル行列 H に基づいて、 HH^* の固有値 λ_1, λ_2 を求める。 $M=N=2$ であるため、 HH^* は 2×2 型の行列になり、その階数 (rank) が2であれば、2つの固有値 λ_1, λ_2 ($\lambda_1 \geq \lambda_2$) が得られる。

【0022】

(3) (1) 及び (2) の手順を多数回反復し、多数の固有値 $\lambda_1(j), \lambda_2(j)$ を求める (j は、多数の試行回数を表す)。

【0023】

(4) 大きい方の固有値 λ_1 に関する分布及び累積分布を調べることで、グラフMIMO ch 1が得られ、小さい方の固有値 λ_2 に関する分布及び累積分布を

調べることで、グラフMIMOch2が得られる。また、固有値 λ_1 , λ_2 の平均値 λ_{ave} に関する分布及び累積分布を調べることで、グラフMIMOaverageが得られ、固有値 λ_1 , λ_2 の合計 λ_{total} に関する分布及び累積分布を調べることで、グラフMIMOtota1が得られる。更に、比較のために、1入力1出力(SISO: Single Input Single Output)方式の無線通信システムの場合の値(h_{11}^2)も、グラフSISOとして描かれている。

【0024】

図2を参照するに、固有値の大小関係に対応して、小さい固有値 λ_2 の累積分布を示すグラフMIMOch2が左側に位置し、大きい固有値 λ_1 の累積分布を示すグラフMIMOch1が右側に位置している。例えば、小さい固有値 λ_2 については、その90%が0dB以下の大きさに該当するが、大きい固有値 λ_1 については、0dB以下の大きさに該当するのは数%程度に過ぎないことが分かる。

【0025】

図3も、同様のシミュレーション結果を示すが、 $M=N=4$ の場合について行われている点で異なる。即ち、このシミュレーションでは、4種類の固有値 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \lambda_4$ についての分布及び累積分布を調べることで、順にグラフMIMOch1乃至4が得られ、固有値の平均値及び合計についての分布、累積分布を調べることで、グラフMIMOaverage及びグラフMIMOtota1が得られる。更に、比較用に、SISOの場合のグラフも描かれている。図3を参照するに、固有値 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ の大小関係に合わせて、その累積分布も並んでいることが分かる。

【0026】

図4は、(1)～(3)の手順により算出された固有値に基づいて通信路容量を算出し、その通信路容量に関する累積分布を調べた場合のシミュレーション結果を示す。このシミュレーションでは、信号対雑音比(SNR: Signal to Noise Ratio)が18dBであることが想定されている。大きい方の固有値 λ_1 に基づく通信路容量の分布及び累積分布を調べることで、グラ

グラフ $MIMO_{ch1}$ が得られ、小さい方の固有値 λ_2 に基づく通信路容量の分布及び累積分布を調べることで、グラフ $MIMO_{ch2}$ が得られる。固有値 λ_1 , λ_2 の平均値 λ_{ave} に基づく通信路容量の分布及び累積分布を調べることで、グラフ $MIMO_{average}$ が得られ、固有値 λ_1 , λ_2 の合計 λ_{total} に基づく通信路容量の分布及び累積分布を調べることで、グラフ $MIMO_{total}$ が得られる。また、 λ_{ave} に基づくチャネル容量を 2 倍にすることで、グラフ $MIMO_{average\ total}$ が得られる。更に、比較のために、1 入力 1 出力 (SISO) 方式の無線通信システムの場合の通信路容量も、グラフ SISO として描かれている。

【0027】

上述したように、固有値の大小は、通信路容量の大小に関連するので、図 2 の場合と同様に、図中左側に、小さい固有値 λ_2 に基づいて算出された通信路容量を示すグラフ $MIMO_{ch2}$ が描かれ、右側に大きい固有値 λ_1 に基づく通信路容量を示すグラフ $MIMO_{ch1}$ が描かれている。例えば、小さい固有値 λ_2 については、約 90% のチャネル容量が 5 bps/Hz 以下になってしまうが、大きい固有値 λ_1 については、5 bps/Hz 以下になるのは数% 程度に過ぎないことが分かる。更に、小さい固有値 λ_2 に関する通信路容量 ($MIMO_{ch2}$) は、SISO の場合より小さくなっていることも分かる。また、平均値 λ_{ave} に基づく通信路容量の全体 $MIMO_{average\ total}$ は、各固有値 λ_i に基づく通信路容量の全体 $MIMO_{total}$ より大きな通信路容量を与えていることも分かる。

【0028】

図 5 も同様のシミュレーション結果を示すが、 $M=N=4$ の場合について行われている点で異なる。即ち、このシミュレーションでは、4 種類の固有値 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \lambda_4$ に基づく通信路容量の分布及び累積分布を調べることで、順にグラフ $MIMO_{ch1}$ 乃至 4 が得られ、固有値の平均値及び合計に基づく通信路容量の分布及び累積分布を調べることで、グラフ $MIMO_{average}$ 及びグラフ $MIMO_{total}$ が得られる。また、平均値 λ_{ave} に基づく通信路容量を 4 倍することでグラフ $MIMO_{average\ total}$ が得られる。更に

、比較用に、SISOの場合のグラフも描かれている。図4を参照するに、固有値 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ の大小関係に対応して、その累積分布も並んでいることが分かる。

【0029】

図6は、行列 HH^* の各固有値に対応する通信路に、BPSK変調を施した信号を送送させた場合の誤り率(BER)に関するシミュレーション結果を示す。ここでは、 $M=N=2$ であることを想定している。小さい固有値 λ_2 に関する通信路の誤り率を調べることで、グラフMIMOch2が得られ、大きい固有値 λ_1 に関する通信路の誤り率を調べることで、グラフMIMOch1が得られる。固有値の平均値及び合計値に関する通信路の誤り率を調べることで、グラフMIMOave及びグラフMIMOtota1が得られる。また、平均値 λ_{ave} に基づく通信路容量の全体に対する誤り率を調べることで、グラフMIMOaverage tota1が得られる。更に、比較用に、SISOの場合のグラフも描かれている。

【0030】

図示されているように、大きい固有値 λ_1 に関する通信路の誤り率は低く、小さい固有値 λ_2 に関する通信路の誤り率は大きいことが分かる。即ち、大きい固有値 λ_1 は良好な通信路を与えるが、小さい固有値 λ_2 は良好な通信路を与えない。例えば、 E_b/N_0 が10dBの場合に、大きい固有値の通信路の誤り率(MIMOch1)は 10^{-5} 程度に過ぎないが、小さい固有値の通信路の誤り率(MIMOch2)は 10^{-2} より悪くなってしまう。

【0031】

図7も、行列 HH^* の各固有値に対応する通信路に、BPSK変調を施した信号を送送させた場合の誤り率(BER)に関するシミュレーション結果を示す。但し、 $M=N=4$ であることを想定している。4種類の固有値 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \lambda_4$ に関する通信路の誤り率を調べることで、順にグラフMIMOch1乃至4が得られ、固有値の平均値及び合計に関する通信路の誤り率を調べることで、グラフMIMOaverage及びグラフMIMOtota1が得られる。また、平均値 λ_{ave} に基づく通信路容量の全体に対する誤り率を調べることで、グラフMIMOaverage tota1が得られる。更に、比較用に、SISO

0の場合のグラフも描かれている。

【0032】

図7を参照するに、固有値 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ の大小関係に対応して、誤り率を示すグラフも並んでいることが分かる。即ち、大きい固有値は良好な通信路を与えるが、小さい固有値は良好な通信路を与えない。特に、最小の固有値 λ_4 に関する通信路の誤り率は、SISOの場合よりも悪くなっている。

【0033】

このように、固有値に関する累積分布、固有値に基づいて算出される通信路容量及び誤り率によれば、小さな固有値に関する通信路は、スループットや誤り率等の観点からSISOの場合よりも良好でない通信路となり得ることが分かる。その結果、全体の通信路容量 C_{all} が目減りしてしまうこともあり得る。例えば、 $M=N=2$ の場合に、大きい固有値 λ_1 に関する通信路容量を C_{large} とし、小さい固有値 λ_2 に関する通信路容量を C_{small} とした場合に、全体の通信路容量 C_{all} は、

$$C_{all} = C_{large} + C_{small}$$

で表される。この場合に、小さい固有値 λ_2 に関する通信路容量 C_{small} の部分が実際に使用できない場合は、全体の通信路容量 C_{all} が少なくなってしまう。

【0034】

本発明では、そのように極端に小さな固有値が発生することを抑制することで、通信路容量全体を有効に利用しようとするものである。本発明は、算出される固有値のばらつきが小さくなるように、行列 HH^* の行列要素、即ち通信路行列 H の行列要素 h_{ij} を調整しながら制御を行う。より具体的には、先ず、現在のチャネル行列 H に基づいて、 HH^* の固有値が算出され、それら固有値の平均値 λ_{ave} が算出される。この平均値 λ_{ave} に等しい固有値を与えるような行列 $(H') (H')^*$ 、即ちチャネル行列 H' の行列要素 h_{ij}' が逆算される。そして、現在のチャネル行列 H が、逆算されたチャネル行列 H' に近づくように、アンテナの指向性が制御される。その結果、更新されたチャネル行列に基づく通信路では、固有値のばらつきは小さくなる。最もばらつきの小さくなる場合と

しては、総ての固有値が λ_{ave} に等しくなるような場合である。仮にそのような通信環境が実現されたならば、通信路容量は従来よりも有効に活用され得る。

【0035】

例えば、 $M=N=2$ の場合に、固有値 λ_{ave} に関する通信路容量を C_{ave} とすると、全体の通信路容量 C_{all} は、

$$C_{all} = 2 C_{ave}$$

で表される。固有値の平均値 λ_{ave} に基づく通信路容量は、図4, 5におけるグラフ $MIMO_{average}$ で示され、その場合の全体の容量は、グラフ $MIMO_{average\ total}$ で示される。図4の例では2つの通信路の各々がグラフ $MIMO_{average}$ で示される容量を与え、図5の例では4つの通信路の各々がグラフ $MIMO_{average}$ で示される容量を与える。平均値による通信路容量を階数倍することで算出された全体の通信路容量は、各固有値に基づく通信路容量の総和より大きくなる。しかも、平均値に基づく通信路容量 ($MIMO_{average}$) は、 $SISO$ の場合より良好な通信路を与える。より正確には、 HH^* の各固有値がそれらの平均値になるようにチャネル行列 H の行列要素を調整できたとすると、調整後の行列に関する通信路容量が $SISO$ の場合より小さくなる確率は著しく減少する。更に、図6, 7に示されるように、固有値の平均値 λ_{ave} に基づく通信路の誤り率 (グラフ $MIMO_{average}$) は、固有値がばらついているときの誤り率 (グラフ $MIMO_{total}$) よりも非常に低くなっている。

【0036】

このように、ばらつきの少ない固有値が得られると、それらに対応する通信路容量のばらつき及び誤り率も少なくなり、通信路容量の全体を有効に利用することが可能になる。このような傾向は、 $M=N=2, 4$ に限らず、一般的な N, M についても成立することが当業者には理解されるであろう。

【0037】

【発明の実施の形態】

図8は、本願実施例による $MIMO$ 方式の無線通信システムに使用される無線通信装置 802, 804 を示す。無線通信装置 802 は、高周波信号を送信又は

受信するM個のアンテナ部806を有する。Mは2以上の整数である。本実施例では、アンテナ部806に使用するアンテナは、択一的なスイッチ又は周波数共用器（図示せず）等を利用して、送信及び受信に共用されるものである。しかし、他の実施例では送信及び受信の各々に別々のアンテナ部及びそれに付随する要素を設けることも可能である。本実施例では、これらM個のアンテナ部806の各々は、指向性を制御することの可能な適応アレーアンテナにより形成される。しかし、他の実施例では、M個の内の一部のアンテナ部806が適応アレーアンテナにより形成され、それ以外のアンテナ部806の各々は1つの給電アンテナにより形成されるようにすることも可能である。どのアンテナ部806を適応アレーアンテナとするかは、後述するように、調整する対象となる行列要素 h_{ij} に関連して決定される。

【0038】

無線通信装置802は、M個のアンテナ部806の各々に対応して設けられた変換部808を有し、各変換部808は、アンテナ部806に関するアナログ信号と、後述する重み付け制御部に関するデジタル信号との間で信号形式を変換する。変換部808は、送信時はデジタルアナログ変換器として機能し、受信時はアナログデジタル変換器として機能する。本実施例とは異なり、送信経路及び受信経路が別々に設けられる場合には、デジタルアナログ変換部及びアナログデジタル変換部を別々に設けることも可能である。

【0039】

無線通信装置802は、M個のアンテナ部806の各々に関する重み（ウェイト）等を制御する重み付け制御部810を有する。無線通信装置802は、各変換部808に入力されるデジタル信号、又は各変換部808から出力されるデジタル信号に適切な重み μ_j を与えることが可能である。但し、jは1以上M以下の整数である。

【0040】

簡単のため、本実施例では無線通信装置802、804は同様な構成を有するものとしているので、無線通信装置804に関する詳細な説明は省略される。但し、無線通信装置804は、N個のアンテナ部812を有し、それら各々に変換

部 814 が設けられる。N も 2 以上の整数であり、上記の M と同一であっても良いし、異なっても良い。変換部 814 に対するデジタル信号には、重み付け制御部 816 により重み w_i が与えられる。但し、 i は 1 以上 N 以下の整数である。

【0041】

図 9 は、重み付け制御部 810、816 の機能ブロック図を示す。重み付け制御部は、各種の機能要素の動作を制御するコントローラ 902 を有する。重み付け制御部はアンテナ部から得られた信号を測定する測定部 904、チャネル行列に関する情報を通信相手に通知するための通知部 906、行列 HH^* の固有値等を算出する固有値算出部 908、更新後のチャネル行列 H' を算出する逆算部 910、及び適応アレーアンテナの指向性を制御する重み調整部 912 を有する。指向性の制御は、希望波にメインビームを向けるビームフォーミングにより行っても良いし、干渉波にヌルを向けるヌルステアリングによって行っても良いし、又はそれらを組み合わせて行っても良い。いずれにせよ、結果的に信号対（干渉＋雑音）比が最大となるように、指向性を調整することが可能であればよい。

【0042】

動作を次に説明する。説明の便宜上無線通信装置 802 を受信側とし、無線通信装置 804 を送信側とするが、送信側及び受信側を逆にすることも当然に可能である。まず、無線通信装置 802 は、アンテナ部 806 から得られた高周波信号に対して、周波数変換及び帯域制限等のフロントエンドに関する処理を施し、変換部 808 にてアナログ信号をデジタル信号に変換し、適切な重みを付加してそれを重み付け制御部 810 に導入する。尚、簡単のため、フロントエンドに関する処理要素は図示されていない。重み付け制御部 810 では、受信した信号を測定することで、現在のチャネル行列 H の行列要素 h_{ij} を測定して求める。但し、 i は 1 以上 N 以下の整数であり、 j は 1 以上 M 以下の整数である。測定により求められた行列要素に関する情報は、例えば無線通信装置 804 のような通信相手に、無線チャネルを通じて通知される。この通知のための信号処理は、コントローラ 902 の制御の下に通知部 906 にて行われる。このような通知が行われることで、送信側及び受信側双方の無線通信装置 802、804 が、現在の

チャネル行列 H に関する知識を共有することが可能になる。測定部 904 や通知部 906 は総ての無線通信装置に必須ではないが、無線通信装置は、少なくとも、現在のチャネル行列 H に関する情報を利用することが可能であることを要する。

【0043】

重み付け制御部は、測定された又は通知された現在のチャネル行列 H に基づいて、行列 HH^* の固有値 λ_i （但し、 i は1以上 r 以下の整数であり、 r は行列 HH^* の階数（rank）を表す。）、各固有値の合計値、固有値の平均値 λ_{ave} 等を算出する。これらの処理は、固有値算出部 908 により行われる。本実施例では、 M 個のアンテナ部 806 と N 個のアンテナ部 812 が存在するので、チャネル行列 H は $N \times M$ 型の行列になり、 HH^* は $N \times N$ 型の正方行列になる。従って、一般的には N 個の固有値 λ_i が得られる（ $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_N$ ）。

【0044】

重み付け制御部は、総ての固有値が平均値 λ_{ave} となるようなチャネル行列 H_{ave} を、平均値 λ_{ave} から逆算して求める。即ち、行列 $(H_{ave})(H_{ave})^*$ の固有値が総て λ_{ave} となるような、チャネル行列 H_{ave} を算出する。これらの処理は、逆算部 910 によって行われる。

【0045】

重み付け制御部は、現在のチャネル行列 H が、逆算したチャネル行列 H_{ave} に近づくように、アンテナ部 806 の適応アレーアンテナの指向性を制御する。この処理は、重み調整部 912 によって行われる。チャネル行列の内容を調整する具体的な手法には様々なものがあり得る。例えば、行列要素 h_{ij} を大きくすることは、次のようにして行うことが可能である。まず、無線通信装置 802 側の M 個のアンテナ部 806 の各々に、互いに直交する符号系列 $C_1 \sim C_M$ を事前に割り当てておく。同様に、無線通信装置 804 側の N 個のアンテナ部 812 の各々にも、互いに直交する符号系列 $D_1 \sim D_N$ を事前に割り当てておく。これらの符号系列は送信側及び受信側の双方で既知であるとする。そして、無線通信端末 804 の j 番目のアンテナ部 812 が、符号系列 C_j の到来方向にメインビームを向け、無線通信端末 802 の i 番目のアンテナ部 806 が、符号系列 D_i の

到来方向にメインビームを向ける。このような操作を双方で行うことで、チャネル行列 h_{ij} を調整することが可能になる。尚、各符号は互いに直交しているので、行列要素の各々を区別することが可能である。逆に、メインビームを向ける代わりにヌルを向けるようにすれば、その行列要素 h_{ij} を小さくすることが可能になる。尚、指向性の制御は、アンテナ部 806, 812 毎に設けられた重み μ_j, ν_i と独立に行っても良いし、それらと連携して行っても良い。

【0046】

本実施例では、M個のアンテナ部 806, 812 の総てが適応アレーアンテナにより形成されており、アンテナ部 806, 812 毎に別々に指向性を調整することが可能である。従って、総ての行列要素 h_{ij} を調整することが可能になる。この点、総てのアンテナ部 806, 812 が適応アレーアンテナではなく、単独のアンテナ素子によって形成されている従来の MIMO 方式における無線通信装置と大きく異なる。また、総ての行列要素ではなく、一部の行列要素 h_{ij} だけが調整の対象になる場合には、複数の内の一部のアンテナ部のみを適応アレーアンテナにすることも可能である。

【0047】

本実施例では、逆算部 910 で算出される行列は、総ての固有値が平均値 λ_{ave} となるものであった。上述したように、そのような通信環境が実現されたならば、固有値のばらつきは無くなり、得られる通信路は総て同一の通信路容量 C_{ave} となり、所与の通信路容量 C_{all} の総てを有効に利用することが可能になる。しかしながら、本発明の原理によれば、固有値のばらつきをゼロにするだけでなく、固有値のばらつきの幅を小さくするだけでも有利な効果が得られる。極端に小さな固有値が発生しなければ、即ちスループットや誤り率が極端に悪い通信路が発生しなければ、総ての通信路容量 C_{all} を現実の通信に使用することができるからである。このため、逆算部 910 で算出される行列 H' に関し、 $(H') (H')^*$ の固有値が、平均値 λ_{ave} を含むが最小の固有値 λ_{min} を含まない所定の範囲内に収まるように、行列 H' を算出することも有利である。また、最小及び最大の固有値を含まないが平均値 λ_{ave} を含むような範囲を設定することも可能である。いずれにせよ、新たに算出される行列 $(H') (H$

’) * の固有値のばらつきが、現在の行列 HH^* の固有値のばらつきよりも狭くなればよい。

【0048】

本実施例におけるアンテナ部 806, 812 に使用され得る適応アレーアンテナの形式は、変換部 808, 814 にアナログ信号を与える又はそこからアナログ信号を受けることの可能な任意の形式であり得る。例えば、アンテナ部 806, 812 に空間合成型やフェーズドアレー型等を採用することが可能である。

【0049】

図 10 は、あるアンテナ部 806, 812 に使用することの可能な空間合成型の適応アレーアンテナの例を示す。図示されているように、この適応アレーアンテナ 1000 は、図 8 の変換部 808, 814 に接続される 1 つの給電アンテナ素子 1002 と、複数の無給電アンテナ素子 1004 を有する。簡単のため、周波数変換や帯域制限等を行うフロントエンドに関する処理要素は図示されていない。各アンテナ素子は、それらの間の空間相関が大きくなるように例えば半波長以下の距離に接近して設けられる。複数の無給電アンテナ素子 1004 の各々は、制御信号に応じてリアクタンスを変化させることの可能な可変リアクタンス回路部 1006 を通じて接地電位に接続されている。可変リアクタンス回路部 1006 に対する制御信号は、可変リアクタンス制御回路部 1008 により適応制御される。この可変リアクタンス制御回路部 1008 は、重み付け制御部 810, 816 の内部に設けても良いし、別個に設けても良い。更に、その制御信号も、アンテナ部 806, 812 に対する重み μ_j , ν_i と連携させて形成しても良いし、独立させて形成しても良い。

【0050】

このような空間合成型の適応アレーアンテナを採用すると、制御対象となる素子数が少なくて済むので（例えば、1 つの可変リアクタンス回路部 1006 は、1 つのコンデンサで形成することが可能である。）、チャネル行列の行列要素 h_{ij} を簡易に調整することが可能になる。

【0051】

図 11 は、あるアンテナ部 806, 812 に使用することの可能なフェーズド

アレー型の適応アレーアンテナを示す。図示されているように、この適応アレーアンテナ 1100 は、複数の給電アンテナ 1102 を有する。適応アレーアンテナ 1100 は、制御信号に応答して、各給電アンテナ 1102 からの信号に重みを付加する高周波重み付け回路部 1104 を有する。高周波重み付け回路部 1104 では、信号の位相が調整される（特殊な用途では、位相に加えて振幅も調整され得る。）。高周波重み付け回路部 1104 からの各出力は、高周波合成回路部 1106 に接続され、合成された 1 つのアナログ信号が出力され、変換部 808, 814 に与えられる。合成されたアナログ信号は、高周波重み付け制御回路 1108 にも与えられ、これは、各給電アンテナ素子に対する重みを制御する。この高周波重み付け制御回路部 1108 も、重み付け制御部 810, 816 の内部に設けても良いし、別個に設けても良い。更に、その制御信号も、アンテナ部 806, 812 に対する重み μ_j , ν_i と連携させて形成しても良いし、独立させて形成しても良い。

【0052】

このようなフェーズドアレー型の適応アレーアンテナを採用すると、高周波重み付け回路部 1104 にて、位相を任意に調整することが可能になり、調整の自由度が大きくなるので、チャネル行列の行列要素 h_{ij} を緻密に調整することが可能になる。

【0053】

図 12 は、アンテナ素子に偏波共用アンテナを利用した場合の例を示す。偏波共用アンテナ 1202, 1204 の各々に対して、高周波重み付け回路部 1206, 1208 が設けられている。高周波重み付け経路部 1206, 1208 は、制御信号に応答して信号に重みを付加し、重み付けされた信号を合成する高周波合成部 1210 に与える。高周波合成部 1210 からの合成後の信号は、変換部 808, 814 に与えられる一方、制御信号を形成する高周波重み付け制御回路にも与えられる。

【0054】

このような構成を採用すると、振幅や位相だけでなく、無線信号の偏波特性をも考慮して、チャネル行列要素 h_{ij} を更に緻密に調整することが可能になる。

【0055】

以上本願実施例によれば、MIMO方式の無線通信装置に使用される複数のアンテナ部の少なくとも1つに適応アレーアンテナが設けられている。そして、無線通信装置の重み付け制御手段にて、固有値のばらつきを小さくするようなチャネル行列が算出され、そのようなチャネル行列に現在のチャネル行列が近づくように、適応アレーアンテナの指向性が制御される。固有値のばらつきが小さくなると（理想的には総ての固有値が λ_{ave} になるので、ばらつきがゼロになる）、それらの固有値に対応する通信路容量のばらつきも小さくなり、その結果、総ての固有値に対応する通信路容量を実際の通信に有効に利用することが可能になる。

【0056】

以下、本発明が教示する手段を列挙する。

【0057】

（付記1） 高周波信号を送信又は受信する複数のアンテナ手段と、前記複数のアンテナ手段に関する重みを与える重み付け制御手段を有する、多入力多出力方式の無線通信システムに使用される無線通信装置であって、

前記複数のアンテナ手段の少なくとも1つを形成する適応アレーアンテナ手段が、複数のアンテナエレメントを有し、複数のアンテナエレメントの各々に関する重みを変化させることで、指向性を変化させることが可能であり、

前記重み付け制御手段が、

前記複数のアンテナ手段の各々に関連する無線伝搬路の伝達特性を表す現在のチャネル行列と、前記現在のチャネル行列の共役転置行列との積で表現される行列の固有値を算出する手段と、

前記算出された固有値の平均値を含むが、前記固有値の最小値を含まない所定の範囲内に、総ての固有値が含まれるようなチャネル行列を算出する逆算手段と、

前記現在のチャネル行列が、前記逆算手段で算出されたチャネル行列に近づくように、前記適応アレーアンテナ手段の指向性を調整する手段

を有することを特徴とする無線通信装置。

【0058】

(付記2) 更に、前記複数のアンテナ手段の各々に対応して設けられ、デジタル信号及びアナログ信号の間で信号形式を変換する変換手段を有し、前記重み制御手段が、複数の変換手段に入力される又はそこから出力される信号に重みを付加することを特徴とする付記1記載の無線通信装置。

【0059】

(付記3) 前記複数のアンテナ手段の各々が、適応アレーアンテナ手段より成ることを特徴とする付記1記載の無線通信装置。

【0060】

(付記4) 前記適応アレーアンテナ手段が、前記複数のアンテナエレメントである複数の給電アンテナと、各給電アンテナからの信号を合成する合成部とを有し、各給電アンテナに関連する高周波信号の相対的な振幅又は位相を変化させることで、前記指向性が調整されることを特徴とする付記1記載の無線通信装置。

【0061】

(付記5) 前記適応アレーアンテナ手段における複数のアンテナエレメントが、1つの給電アンテナ及び複数の無給電アンテナより成り、前記複数の無給電アンテナの各々に設けられた可変リアクタンス値を変化させることで、前記指向性が調整されることを特徴とする付記1記載の無線通信装置。

【0062】

(付記6) 前記適応アレーアンテナ手段における複数のアンテナエレメントが、偏波共用アンテナであることを特徴とする付記1記載の無線通信装置。

【0063】

(付記7) 前記重み付け制御手段が、希望波にメインローブが向くように前記指向性を適応制御することを特徴とする付記1記載の無線通信装置。

【0064】

(付記8) 前記重み付け制御手段が、干渉波にヌルが向くように前記指向性を適応制御することを特徴とする付記1記載の無線通信装置。

【0065】

(付記 9) 更に、受信した高周波信号を測定することで、前記現在のチャンネル行列を求める手段を有することを特徴とする付記 1 記載の無線通信装置。

【0066】

(付記 10) 前記チャンネル行列を求める手段が、前記複数のアンテナ手段の各々に予め割り当てられている互いに直交する符号系列を利用して、前記チャンネル行列の行列要素を区別することを特徴とする付記 9 記載の無線通信装置。

【0067】

(付記 11) 前記所定の範囲が、算出された複数の固有値の最大値及び前記最小値を含まないように設定されることを特徴とする付記 1 記載の無線通信装置。

【0068】

(付記 12) 前記逆算手段が、総ての固有値が前記平均値に等しくなるようなチャンネル行列を算出することを特徴とする付記 1 記載の無線通信装置。

【0069】

(付記 13) 無線送信装置及び無線受信装置を有し、前記無線送信装置又は前記無線受信装置の少なくとも一方が、付記 1 記載の無線通信装置より成ることを特徴とする多入力多出力方式の無線通信システム。

【0070】

(付記 14) 前記無線送信装置及び前記無線受信装置の双方で、前記現在のチャンネル行列が知られていることを特徴とする付記 13 記載の多入力多出力方式の無線通信システム。

【0071】

(付記 15) 前記無線受信装置で求められた前記現在のチャンネル行列が、前記無線送信装置に通知されることを特徴とする付記 13 記載の多入力多出力方式の無線通信システム。

【0072】

【発明の効果】

以上のように本発明によれば、周波数当たりの最大信号伝送速を定めるシャノンの通信路容量の内、実際の通信に利用することの可能な通信路容量を向上させ

ることが可能になる。

【0073】

【図面の簡単な説明】

【図1】

MIMO方式の通信システムの部分概略図を示す。

【図2】

M=N=2の場合の固有値の累積分布のシミュレーション結果を示す図である。

【図3】

M=N=4の場合の固有値の累積分布のシミュレーション結果を示す図である。

【図4】

M=N=2の場合の通信路容量の累積分布のシミュレーション結果を示す図である。

【図5】

M=N=4の場合の通信路容量の累積分布のシミュレーション結果を示す図である。

【図6】

M=N=2の場合の通信路容量に関する誤り率のシミュレーション結果を示す図である。

【図7】

M=N=4の場合の通信路容量に関する誤り率のシミュレーション結果を示す図である。

【図8】

本願実施例によるMIMO方式の無線通信システムに使用される無線通信装置を示す図である。

【図9】

重み付け制御部の機能ブロック図を示す。

【図10】

アンテナ部に使用することの可能な適応アレーアンテナを示す図である。

【図 11】

アンテナ部に使用することの可能な適応アレーアンテナを示す図である。

【図 12】

アンテナ部に使用することの可能な適応アレーアンテナを示す図である。

【符号の説明】

$x_1(t) \sim x_M(t)$ 送信信号ベクトルの成分

$y_1(t) \sim y_N(t)$ 受信信号ベクトルの成分

$h_{11} \sim h_{NM}$ チャネル行列の行列要素

$\mu_1 \sim \mu_M$ 重み

$\nu_1 \sim \nu_M$ 重み

802, 804 無線通信装置

806, 812 アンテナ部

808, 814 変換部

810, 816 重み付け制御部

902 コントローラ

904 測定部

906 通知部

908 固有値算出部

910 逆算部

912 重み調整部

1000 適応アレーアンテナ

1002 給電アンテナ素子

1004 無給電アンテナ素子

1006 可変リアクタンス回路部

1008 可変リアクタンス制御回路部

1100 適応アレーアンテナ

1102 給電アンテナ素子

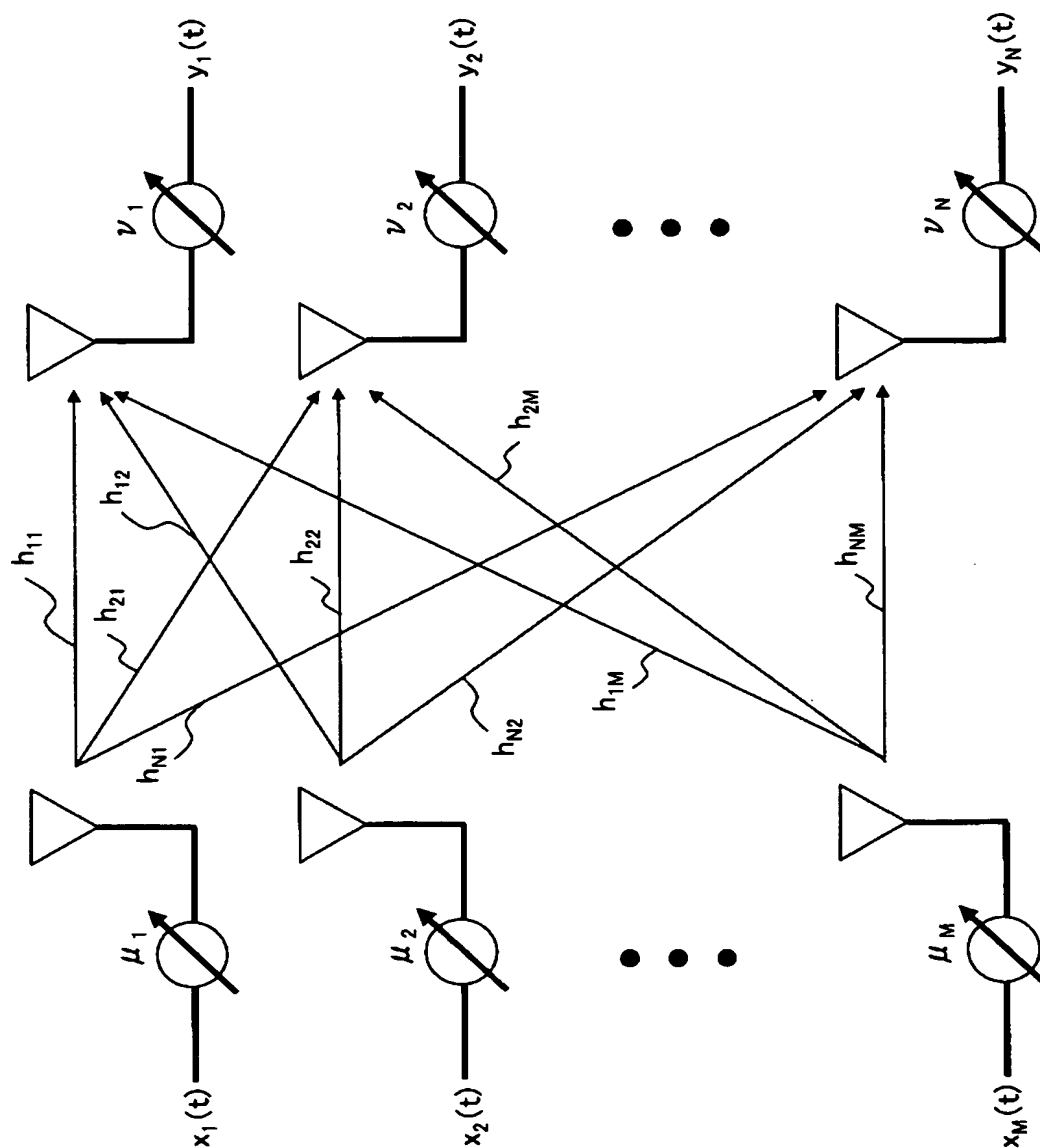
1104 高周波重み付け回路部

- 1 1 0 6 高周波合成回路部
- 1 1 0 8 高周波重み付け制御回路部
- 1 2 0 2, 1 2 0 4 偏波共用アンテナ素子
- 1 2 0 6, 1 2 0 8 高周波重み付け回路部
- 1 2 1 0 高周波合成回路部
- 1 2 1 2 高周波重み付け制御回路部

【書類名】 図面

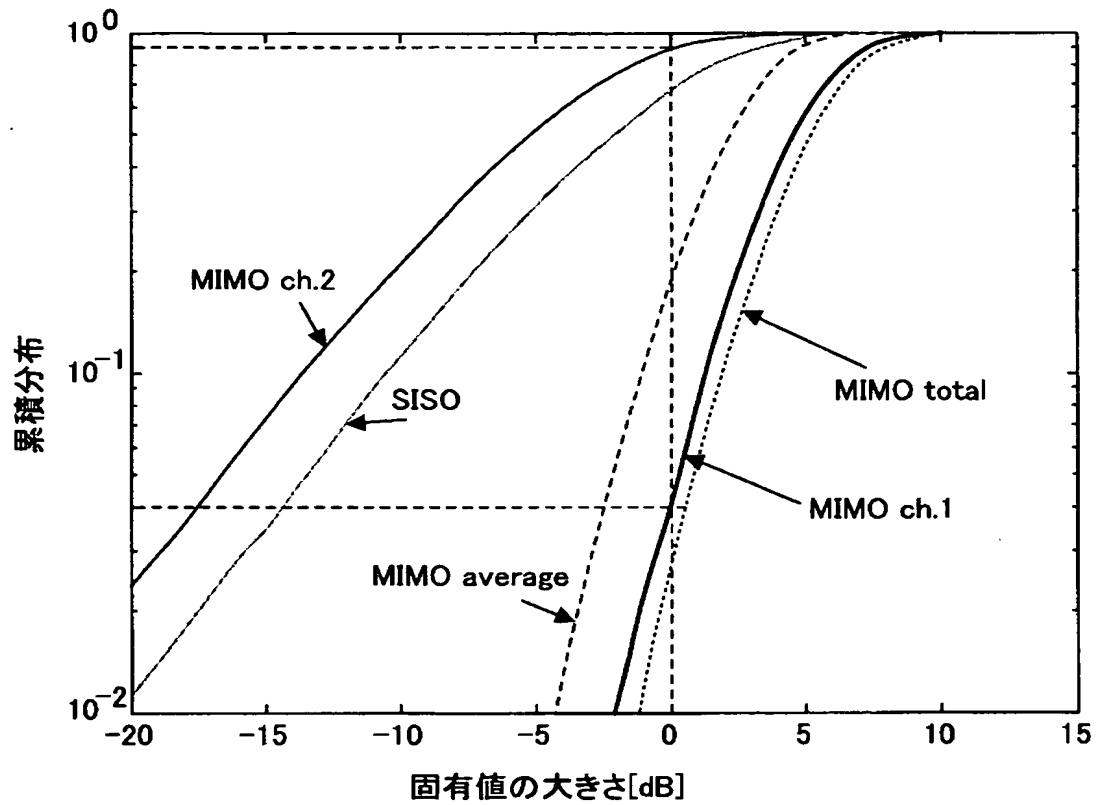
【図 1】

MIMO方式の通信システムの部分概略図



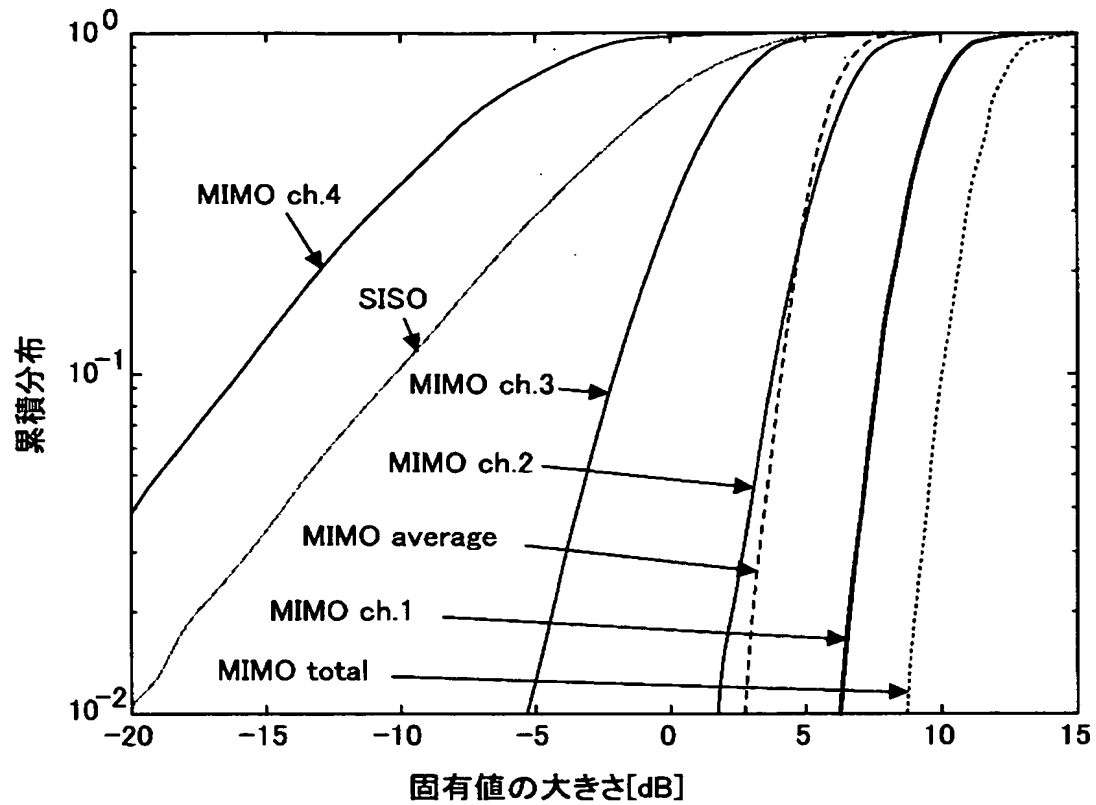
【図 2】

M=N=2 の場合の固有値の累積分布
のシミュレーション結果を示す図



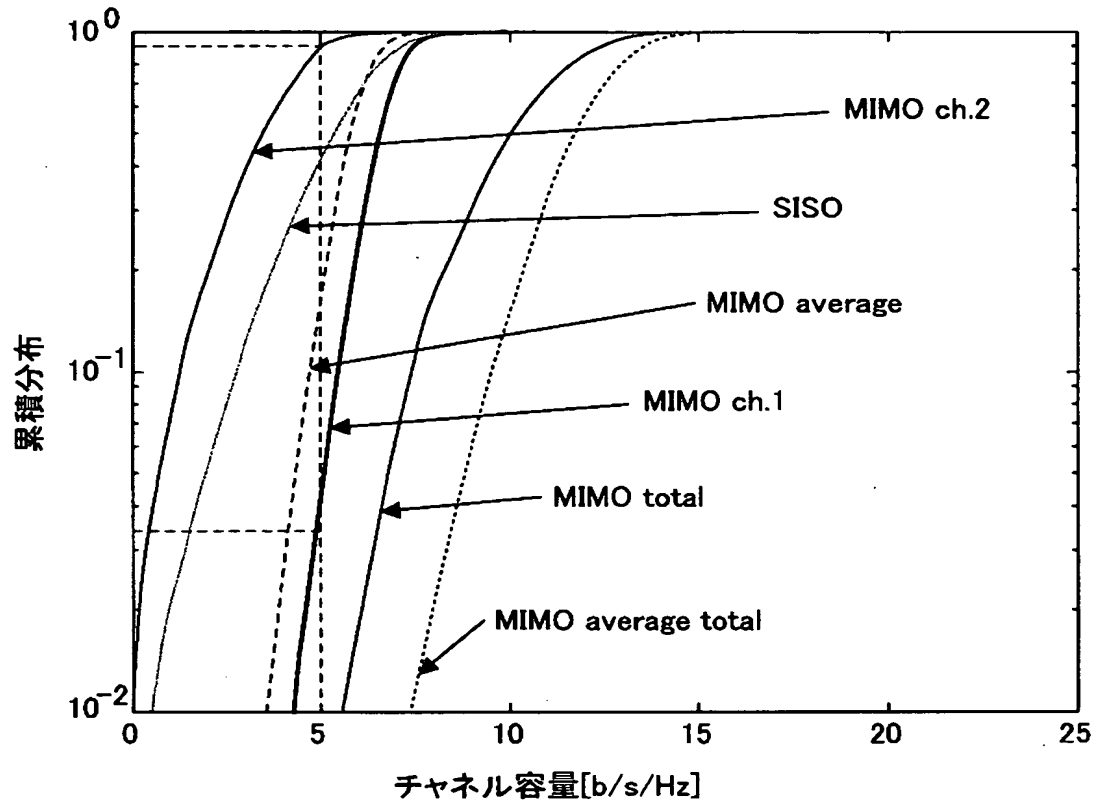
【図 3】

M=N=4 の場合の固有値の累積分布
のシミュレーション結果を示す図



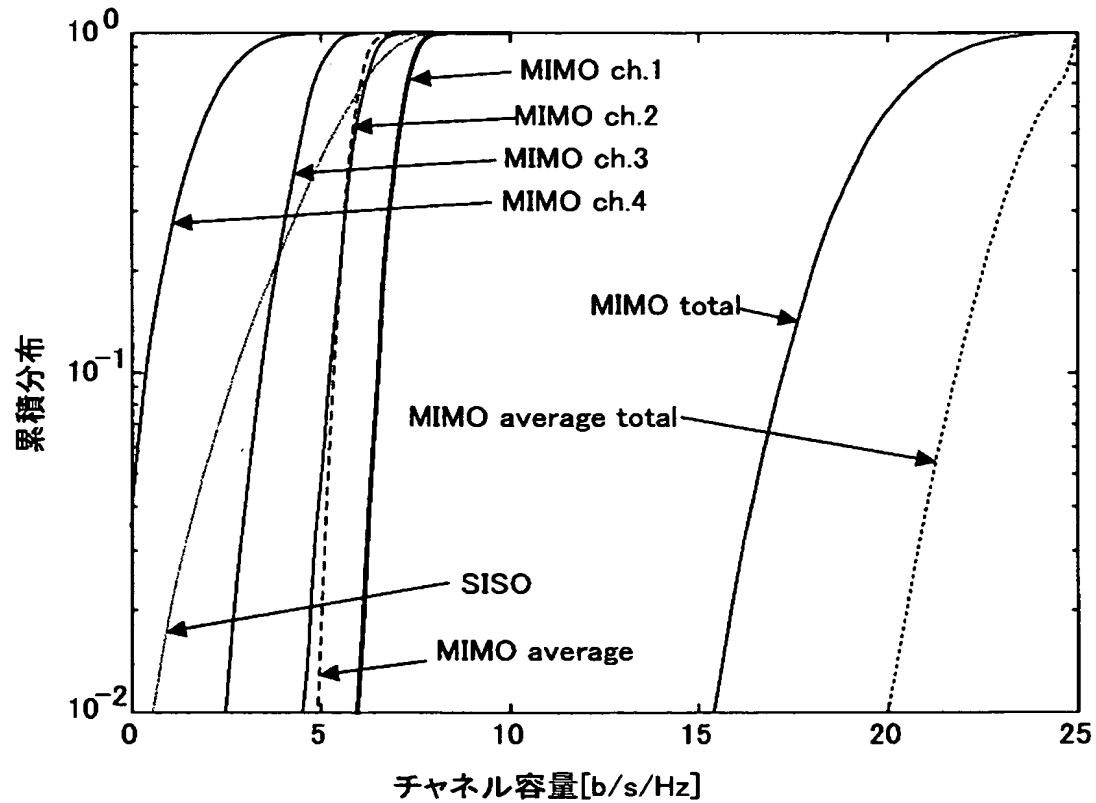
【図 4】

M=N=2 の場合の通信路容量の累積分布
のシミュレーション結果を示す図



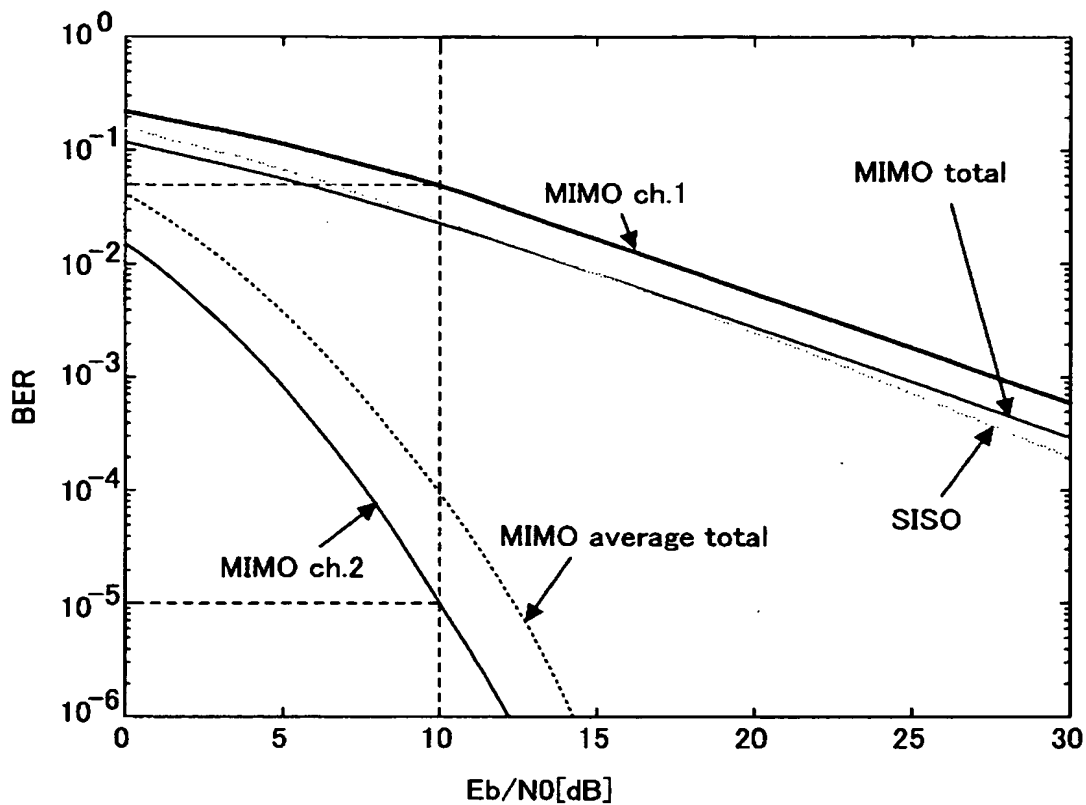
【図 5】

M=N=4の場合の通信路容量の累積分布
のシミュレーション結果を示す図



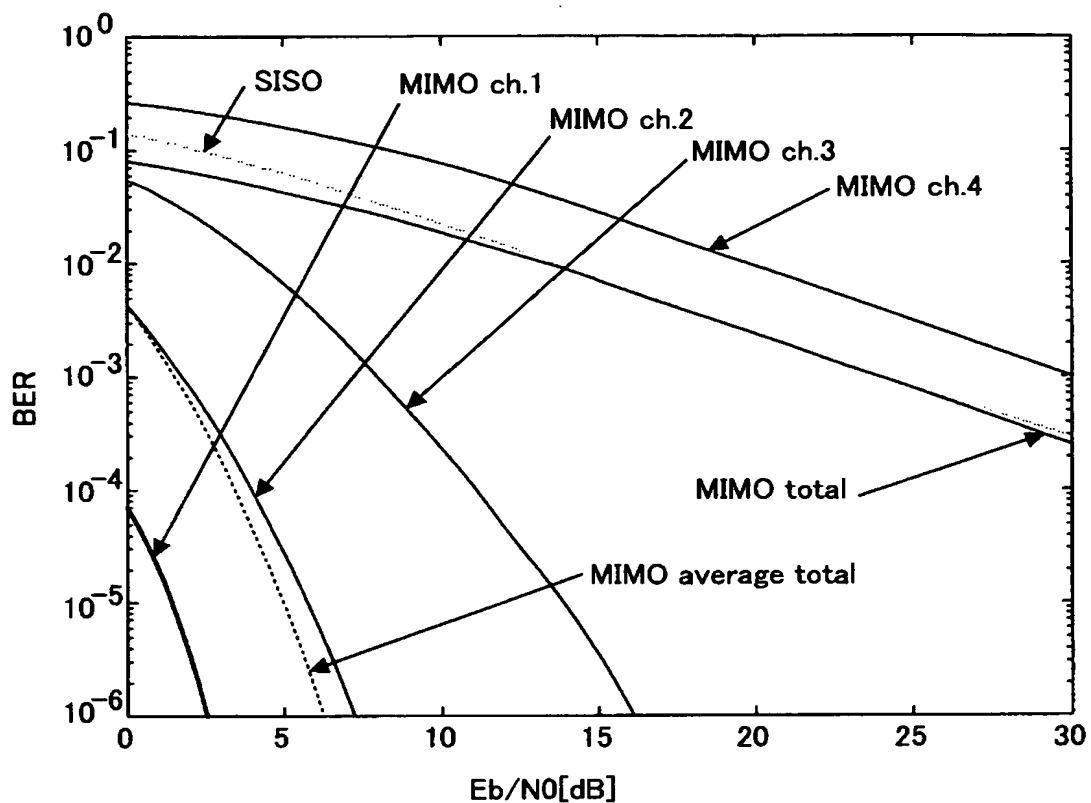
【図 6】

M=N=2の場合の通信路容量に関する
誤り率のシミュレーション結果を示す図



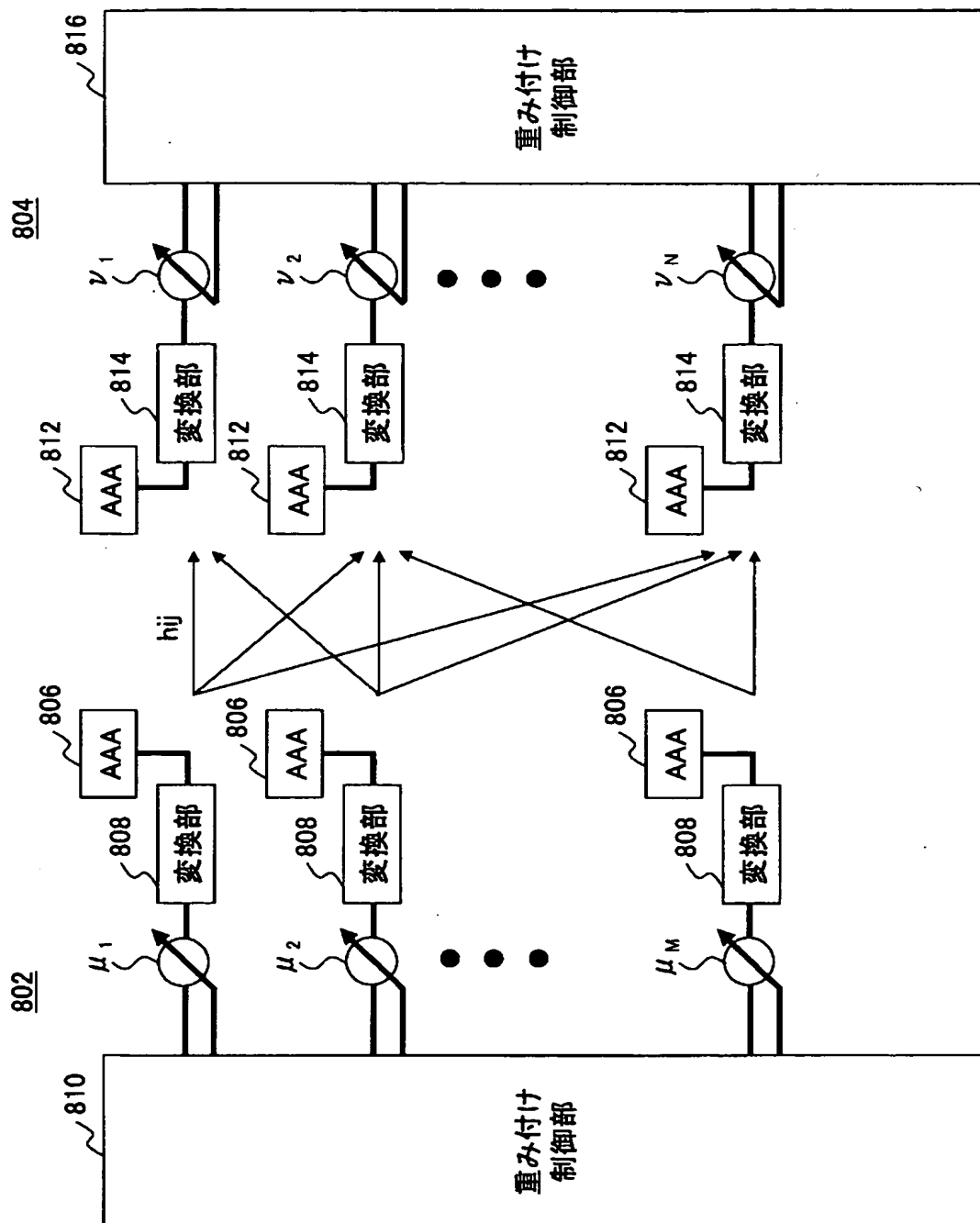
【図 7】

M=N=4の場合の通信路容量に関する
誤り率のシミュレーション結果を示す図



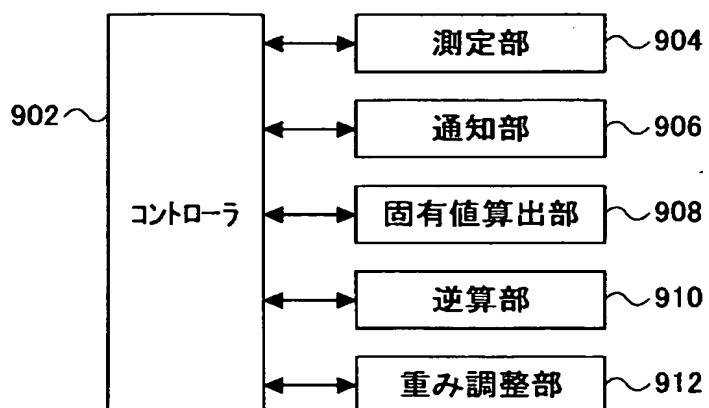
【図 8】

本願実施例によるMIMO方式の無線通信システムに使用される無線通信装置を示す図



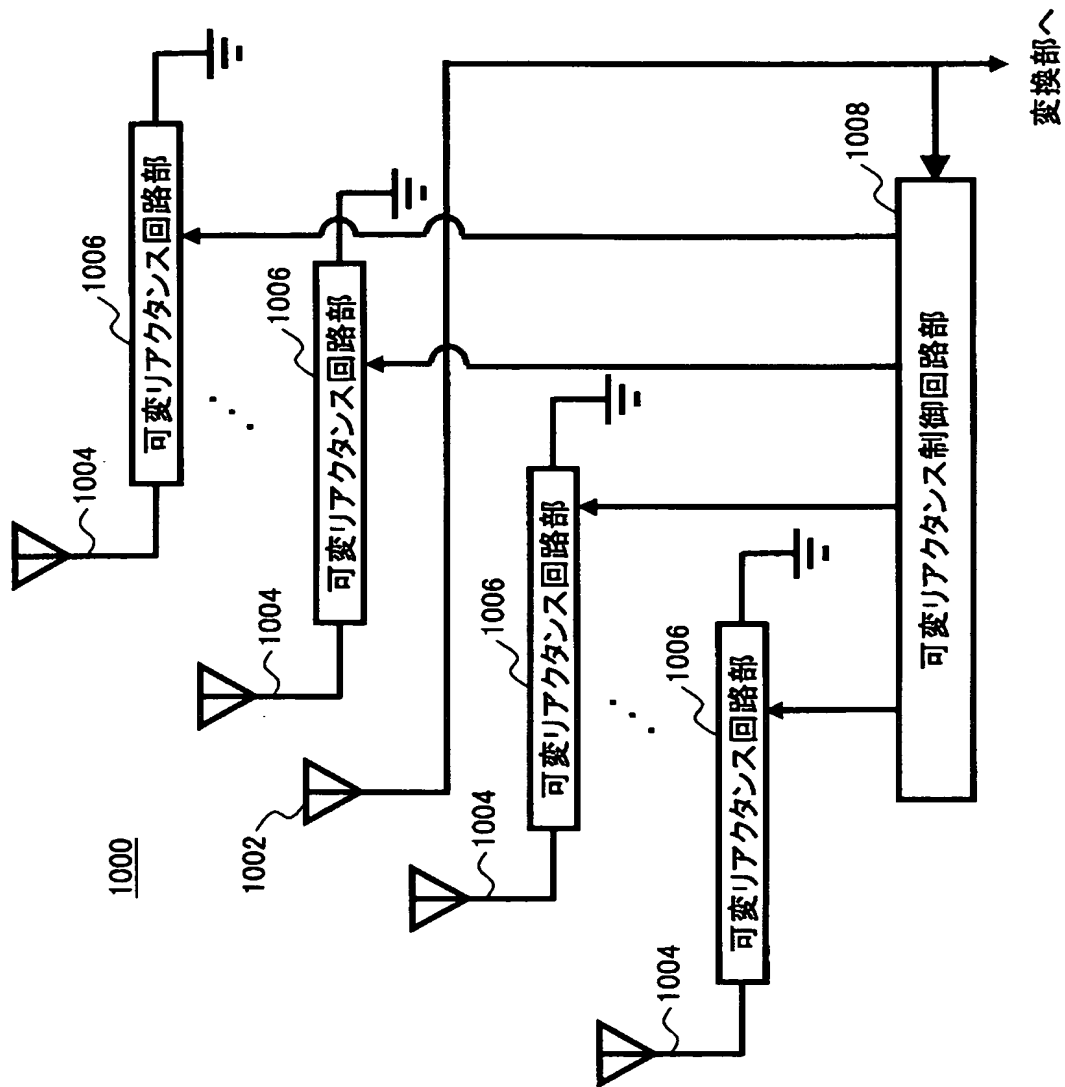
【図 9】

重み付け制御部の機能ブロック図



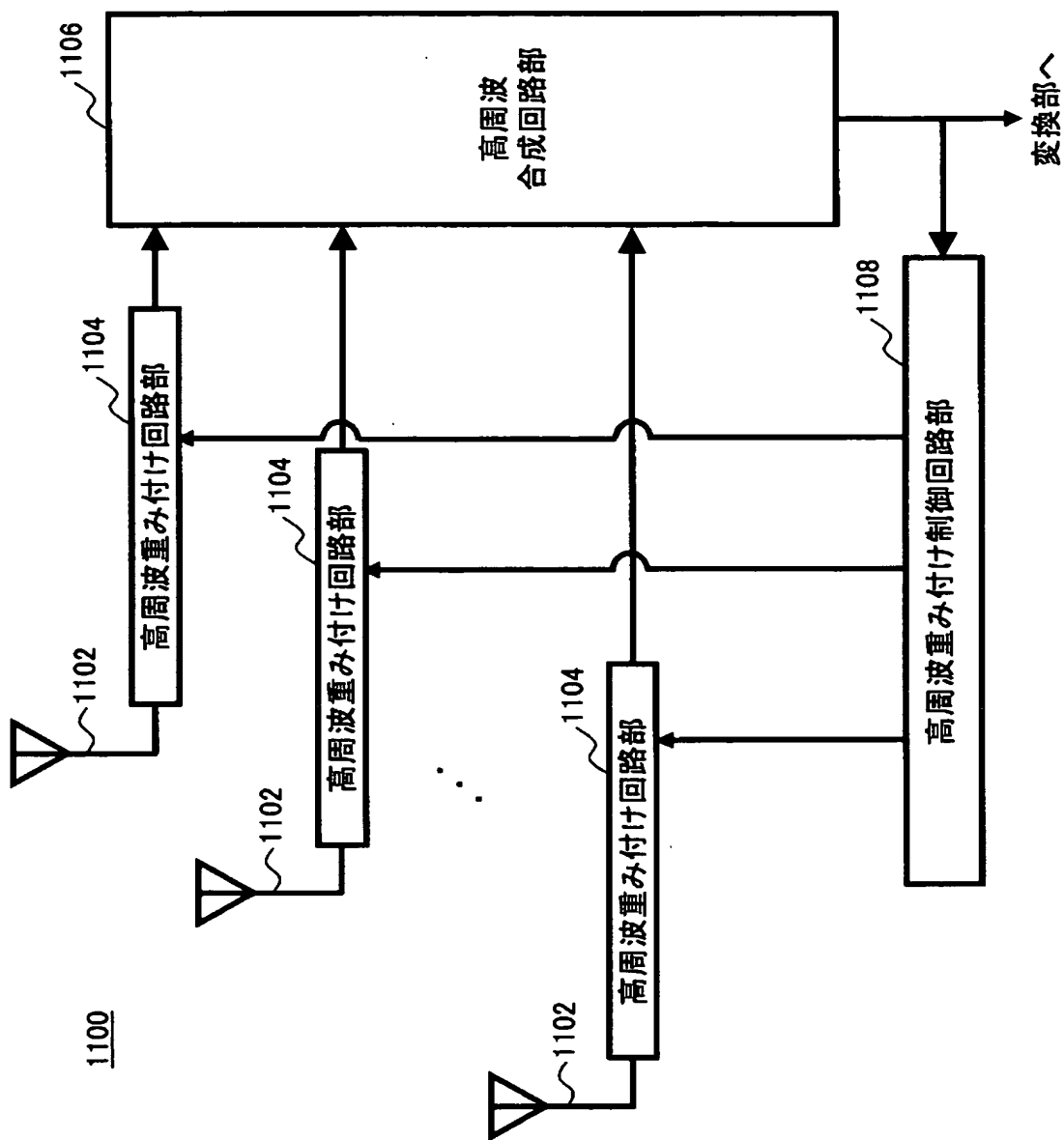
【図 10】

アンテナ部に使用することの可能な適応アレーアンテナを示す図



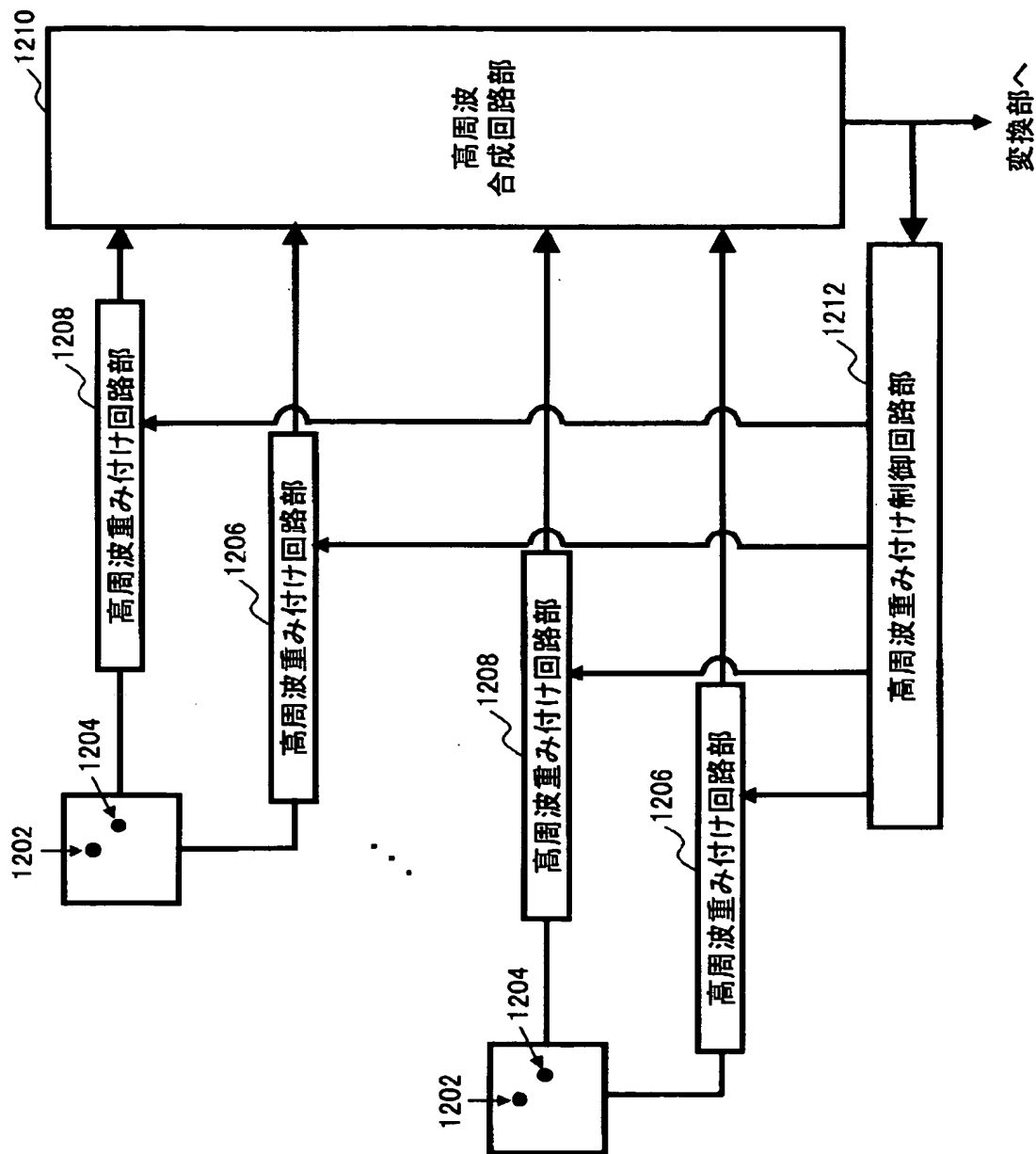
【図 11】

アンテナ部に使用することの可能な適応アレーアンテナを示す図



【図 12】

アンテナ部に使用することの可能な適応アレーアンテナを示す図



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 本発明は、周波数当たりの最大信号伝送速を定めるシャノンの通信路容量の内、実際の通信に利用することの可能な通信路容量を向上させるMIMO方式の無線通信システム及び無線通信装置を提供することを目的とする。

【解決手段】 本発明による無線通信装置は、高周波信号を送受信する複数のアンテナ手段と、それらに関する重みを与える重み付け制御手段を有する。本装置におけるアンテナ手段は、複数のアンテナエレメントの各々に関する重みを変化させることで、指向性を変化させることが可能な適応アレーアンテナ手段より成る。重み付け制御手段は、行列 HH^* の固有値を算出する手段と（ H はチャネル行列）、算出された固有値の平均値を含む所定の範囲内に、総ての固有値が含まれるようなチャネル行列 H' を算出する逆算手段と、現在のチャネル行列 H が、算出されたチャネル行列 H' に近づくように、適応アレーアンテナ手段の指向性を調整する手段を有する。

【選択図】 図8

特願 2 0 0 3 - 2 0 0 4 4 6

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 5 2 2 3]

1. 変更年月日

1 9 9 6 年 3 月 2 6 日

[変更理由]

住所変更

住 所

神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号

氏 名

富士通株式会社